

Prof. Dr.-Ing. Alfons Goris, Universität Siegen

# Verformungsbegrenzung bei Stahlbetonplatten

## Nachweismöglichkeiten, Vorhersagegenauigkeit, kritische Bewertung

Die Verformungen eines Tragwerkes müssen so begrenzt werden, dass das Erscheinungsbild und die Funktion des Bauteils selbst oder angrenzender Bauteile (wie z. B. leichte nichttragende Trennwände, Verglasungen, Außenwandverkleidungen, haustechnische Anlagen) nicht beeinträchtigt werden. In bestimmten Fällen ist zudem eine Begrenzung zur Vermeidung übermäßiger Schwingungen erforderlich.

Die Größe der Verformungen hängt im Stahlbetonbau von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. Neben der Bauteilgeometrie (Querschnitt, Stützweite, Lagerungsbedingungen) und der Belastung wird die Durchbiegung von den Materialeigenschaften (Druck- und Zugfestigkeit sowie Elastizitätsmodul des Betons, Betonstahlfestigkeit) und den zeitabhängigen Größen (Kriechen, Schwinden) beeinflusst. Die aufgeführten Parameter sind streuende Größen, so dass die Durchbiegungen nicht exakt berechnet, sondern nur näherungsweise ermittelt und abgeschätzt werden können.

### 1 Grundsätzliche Anforderungen

Zulässige und im Hinblick auf Schäden unbedenkliche Durchbiegungen können pauschal kaum angegeben werden. Je nach Tragwerk und Anforderung werden Grenzwerte zwischen 1/100 und 1/1000 der Stützweite genannt (vgl. [1]). In den einschlägigen Regelwerken (DIN 1045-1, EC 2) werden für übliche Bauwerke des Hochbaus die in ISO 4356 enthaltenen Grenzwerte wiedergegeben:

- 1/250 der Stützweite für den Bauteildurchhang, um ein angemessenes Erscheinungsbild und die Gebrauchstauglichkeit sicherzustellen.
- 1/500 der Stützweite für die Durchbiegung zur Vermeidung von Schäden an angrenzenden Bauteilen wie z. B. leichte Trennwände, Verkleidungen, Verglasungen; die Durchbiegungsbegrenzung bezieht sich hierbei auf die *nach dem Einbau* dieser Bauteile auftretenden Verformungen.

Bei Kragträgern ist für die Stützweite die 2,4fache Kraglänge anzusetzen.

Überhöhungen sind zulässig, um einen Teil oder den gesamten Durchhang auszugleichen. Die Schalungsüberhöhung sollte jedoch i. Allg. 1/250 der Stützweite nicht überschreiten.

Als Durchhang wird dabei die vertikale Bauteilverformung, bezogen auf die Verbindungslinie der Unterstützungspunkte, als Durchbiegung die vertikale Bauteilverformung, bezogen auf die Systemlinie, bezeichnet. Für die nachzuweisende *Durchbiegung* gilt die Bauteillage zum Zeitpunkt des Einbaus der angrenzenden Bauteile. Im Allg. dürfte das eine verformte Lage sein, da Anfangsdurchbiegungen nach dem Ausschalen bereits aufgetreten sind (s. Bild 1).



**Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Alfons Goris**

Universität Siegen  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Massivbau  
57068 Siegen

Prof. Dr.-Ing. Alfons Goris lehrt Stahlbeton- und Spannbetonbau an der Universität Siegen und ist Autor zahlreicher Veröffentlichungen zum Stahlbetonbau.

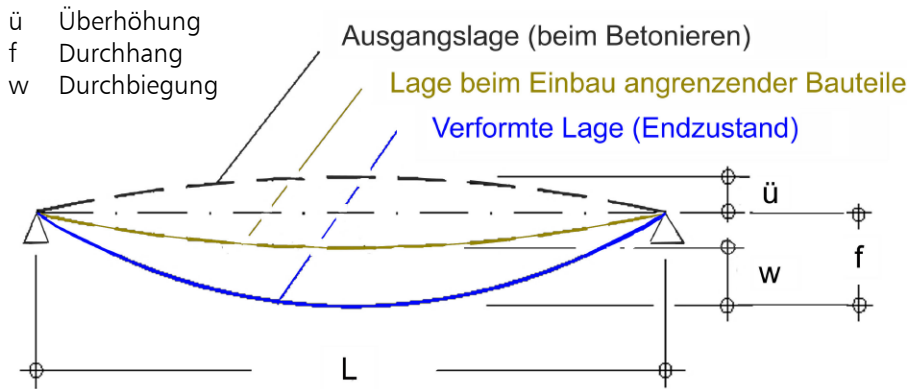


Bild 1. Definition der Verformungen (Erläuterungen s. Text)

In DIN 1045-1 sind konkrete Grenzen nur für Verformungen von biegebeanspruchten Bauteilen in vertikaler Richtung angegeben, zu beachten sind aber beispielsweise auch Auflagerverdrehungen u.a.m, die je nach Situation ebenso kritisch werden können.

Welche Größe von Verformungen das Erscheinungsbild nachhaltig ungünstig beeinflusst, hängt u.a. vom subjektiven Empfinden des Nutzers ab; allgemein gültige Aussagen sind hierzu daher kaum zu machen. Die Gebrauchstauglichkeit und Funktionalität einer Konstruktion kann durch zu große Verformungen nachhaltig ungünstig beeinflusst werden. Bei Entwässerungen ist Gefälle und Bauteildurchhang angemessen aufeinander abzustimmen. Besondere Überlegungen erfordern z. B. auch Maschinen und Geräte, bei denen die Funktionsfähigkeit durch Verformungen nicht beeinträchtigt werden darf.

Bei den Schäden an angrenzenden Bauteilen sind insbesondere die an Trennwänden und vergleichbaren Bauteilen zu nennen. Typische Schadensbilder an Mauerwerkswänden sind in Bild 2 dargestellt [1]. Besonders empfindlich sind aufgrund der großen Sprödigkeit große Glasscheiben (Schau-fenster).

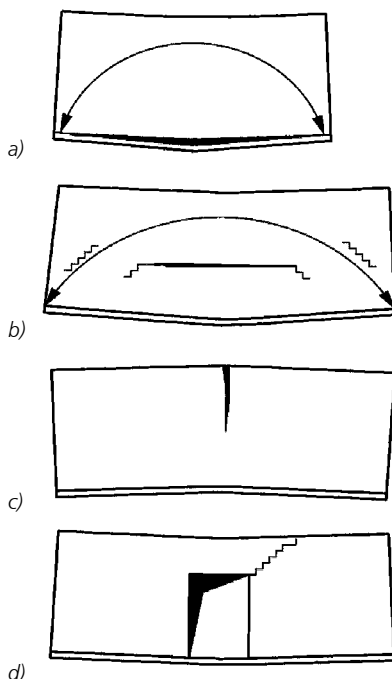


Bild 2. Tragmechanismen und Schadensbilder bei Mauerwerk:  
 a) Muldenlagerung einer kurzen Wand  
 b) Muldenlagerung an einer langen Wand  
 c) Sattellagerung  
 d) Wand mit Türöffnung

Eine Begrenzung der Verformungen, d. h. die Einhaltung der zuvor genannten Grenzwerte  $L/250$  bzw.  $L/500$ , kann erfolgen

- durch Einhaltung von Konstruktionsregeln (Begrenzung der Biegeschlankheit)
- durch einen rechnerischen Nachweis der Verformungen unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens und des zeitabhängigen Betonverhaltens. Die Ermittlung erfolgt i. d. R. mit der quasi-ständigen Einwirkungskombination (vgl. DIN 1055-100).

Obwohl nicht sehr zuverlässig, erfolgt der Nachweis in der Praxis wegen der einfachen Durchführbarkeit sehr häufig durch eine Begrenzung der Biegeschlankheit.

## 2 Konstruktionsregeln zur Begrenzung der Verformungen bei Platten

### 2.1 Regelungen nach DIN 1045-1

In DIN 1045-1 sind als Richtwerte vereinfachende Konstruktionsregeln für Standardfälle angegeben, die als Ersatz für eine genauere Berechnung der auftretenden Verformungen dienen sollen.

Der Verformungsnachweis darf nach DIN 1045-1, 11.3.2 nur für Deckenplatten des üblichen Hochbaus durch eine Begrenzung der Biegeschlankheit geführt werden. Für Normalbeton (für Leichtbeton sind Korrekturfaktoren zu berücksichtigen) gilt danach als erforderliche „Biegeschlankheit“:

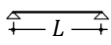
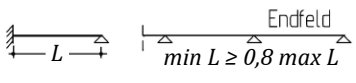
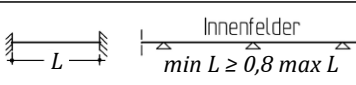
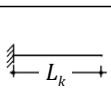
$$\frac{L_i}{d} \leq \begin{cases} 35 & \text{generell} \\ 150 / L_i & \text{im Hinblick auf Schäden} \\ & \text{angrenzender Bauteile} \end{cases} \quad (1a)$$

$$(1b)$$

( $L_i$  und  $d$  in m).

Hierin ist  $L_i = \alpha \cdot L$  als Ersatzstützweite eines frei drehbar gelagerten Einfeldträgers definiert, der unter gleichmäßig verteilter Belastung die gleiche Mittendurchbiegung und Krümmung in Feldmitte besitzt wie das untersuchte Bauteil (bei Kragträgern ist die Durchbiegung am Kragende und die Krümmung am Einspannquerschnitt maßgebend).

Für häufig vorkommende Fälle kann der Beiwert  $\alpha$  der Tabelle 1 entnommen werden. Bei vierseitig gelagerten Platten ist die kleinere Stützweite maßgebend, bei dreiseitig gestützten Platten die Stützweite parallel zum freien Rand; für Flachdecken gilt generell die größere Stützweite. Bei durchlaufenden Tragwerken dürfen die Beiwerte bei  $\min L \geq 0,8 \max L$  verwendet werden. Wenn die genannten Anwendungsgrenzen nicht eingehalten werden, können die  $\alpha$ -Beiwerte z. B. mit Hilfe der Angaben in [2] ermittelt werden. Das gilt ebenso für Kragarme mit elastischer End einspannung.

Statisches System	$\alpha = L_i / L$
	1,00
	0,80 <sup>1)</sup>
	0,60 <sup>1)</sup>
	2,40

<sup>1)</sup> Für Flachdecken bis zu einer Betonfestigkeitsklasse C30/37 sind die Werte um 0,1 zu erhöhen.

Tabelle 1. Beiwerte  $\alpha$  zur Bestimmung der Ersatzstützweite  $L_i$

Diese Regelung wurde von DIN 1045 (Ausg. 1988) übernommen. Sie geht auf Untersuchungen aus den 1960er Jahren zurück [3], die rein empirisch aus einer statistischen Auswertung von Schadensfällen an Decken gewonnen wurden. Diese Untersuchungen wurden allerdings an Bauteilen durchgeführt, die mit einem i. d. R. geringeren Ausnutzungsgrad bemessen wurden; außerdem werden heute höhere Stahl- und Betonfestigkeiten verwendet, so dass diese Untersuchung nur eingeschränkt auf die heutigen Konstruktionen übertragen werden kann. Mit diesen Konstruktionsregeln können die in DIN 1045-1 geforderten Grenzwerte ( $L/250$  bzw.  $L/500$ ) der Verformungen daher i. d. R. rechnerisch nicht nachgewiesen werden.

Insbesondere dann, wenn günstige Einflüsse nicht vorhanden sind (rechnerisch nicht berücksichtigte End einspannung, ein möglicher Querabtrag von Lasten) oder wenn keine geeigneten konstruktiven Maßnahmen (Schalungsüberhöhung o. Ä.) ergriffen werden, sollte daher diese Konstruktionsregel mit Vorsicht angewendet werden und/oder die Verformung rechnerisch nachgewiesen werden.

### 2.2 Festlegungen in Eurocode 2

In Eurocode 2 [4] werden dieselben zulässigen Grenzwerte der Verformungen ( $L/250$  bzw.  $L/500$ ) genannt wie in DIN 1045-1. Dennoch werden als Konstruktionsregel zulässige Biegeschlankheiten angegeben, die im weiten Bereich wesentlich restriktivere Anforderungen stellen als dies in DIN 1045-1 der Fall ist. Es werden differenziertere beanspruchungsabhängige Biegeschlankheitskriterien angegeben, die aus einer rechnerischen Parameterstudie abgeleitet wurden.

Näherungsweise darf die erforderliche Biegeschlankheit nach EC 2 für niedrig beanspruchte Bauteile (das sind Bauteile mit einem Bewehrungsgrad  $\rho = 0,5 \%$ , also i. Allg. Platten) bestimmt werden aus:

$$\frac{L_i}{d} \leq \begin{cases} 20 \cdot f_1 & \text{generell} \\ 20 \cdot f_1 \cdot f_2 & \text{im Hinblick auf Schäden} \\ & \text{angrenzender Bauteile} \end{cases} \quad (2a)$$

$$(2b)$$

mit der Ersatzstützweite  $L_i = L/K$ .

Der Faktor  $K$  berücksichtigt dabei die unterschiedlichen statischen Systeme (entspricht prinzipiell dem reziproken Beiwert  $\alpha$  nach Tabelle 1). Für den Faktor  $K$  gilt nach EC 2 bei Einfeldsystemen  $K = 1,0$ , bei Randfeldern  $K = 1,3$ , Innenfelder  $K = 1,5$  und Kragarmen  $K = 0,4$  sowie für Flachdecken  $K = 1,2$ . Die Werte sind damit häufig etwas ungünstiger als nach DIN 1045-1.

Den Gleichungen (2a) und (2b) liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Betonstahlspannung in der maßgebenden Lastkombination des GZG:  $\sigma_s = 310 \text{ N/mm}^2$
- Beton C30/37

Die so ermittelte Biegeschlankheit darf bzw. muss ggf. modifiziert werden und zwar mit

$$f_1 = 310 / \sigma_s \quad \text{falls die Stahlspannungen unter der Bemessungslast im GZG } \sigma_s \neq 310 \text{ N/mm}^2$$

$$f_2 = 7,0 / L_{\text{eff}} \quad \text{falls die effektive Stützweite größer als 7,0 m (bzw. bei Flachdecken mit } 8,5 / L_{\text{eff}} \text{, falls die Stützweite größer als 8,50 m ist)}$$

Eine Korrektur bei von 0,5 % abweichenden Bewehrungsgraden und bei anderen Betonfestigkeiten kann jedoch mit dem vereinfachten Ansatz nicht erfolgen. Das ist jedoch mit dem nachfolgend dargestellten Gleichungen möglich. Schon an dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Biegeschlankheiten nach Gl. (2a) und (2b) bei Bewehrungsgraden kleiner als 0,5 % und bei Betonfestigkeiten  $f_{ck} > 30 \text{ N/mm}^2$  auf der sicheren Seite liegen, andernfalls liegen sie rechnerisch auf der unsicheren Seite.

Ein differenzierterer Nachweis ist mit dem nachfolgend dargestellten Ansatz möglich (EC 2-1-1, Gl. (7.16a) und (7.16b)):

$$\frac{l}{d} = K \left[ 11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \cdot \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2\sqrt{f_{ck}} \cdot \left( \frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{3/2} \right] \quad \text{für } \rho \leq \rho_0 \quad (3a)$$

$$\frac{l}{d} = K \left[ 11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \cdot \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12}\sqrt{f_{ck}} \cdot \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}} \right] \quad \text{für } \rho > \rho_0 \quad (3b)$$

Es sind

- $K$  Faktor zur Berücksichtigung des statischen Systems (s. vorher)
- $\rho_0$  Referenzbewehrungsgrad; er wird ermittelt aus  $\rho_0 = f_{ck}^{0,5} \cdot 10^{-3}$
- $\rho$  erforderliche Zugbewehrung in Feldmitte (bei Kragarmen an der Einspannstelle)
- $\rho'$  erforderliche Druckbewehrung in Feldmitte (bei Kragarmen an der Einspannstelle)
- $f_{ck}$  charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit in  $\text{MN/m}^2$

Den mit Gl. (3a) und (3b) ermittelten Werten liegt eine Betonstahlspannung in der maßgebenden Lastkombination des GZG von  $\sigma_s = 310 \text{ N/mm}^2$  zugrunde, d.h. sie werden ebenfalls mit dem Faktor  $f_1$  (bei  $\sigma_s \neq 310 \text{ N/mm}^2$ ) modifiziert und bei Stützweiten über 7,0 m (bzw. bei Flachdecken ab 8,50 m) ggf. zusätzlich mit dem Korrekturfaktor  $f_2$ .

### 2.3 Vergleich der normativen Regelungen

Ein Vergleich der erforderlichen Nutzhöhen bzw. Biegeschlankheiten ist in Bild 3 dargestellt. Die Darstellung gilt für frei drehbar gelagerte Einfeldplatten für eine Begrenzung der Verformungen auf L/500 (bei einer Anforderung von L/250 bleiben die erforderlichen Biegeschlankheiten konstant; s. horizontale Linie in der Darstellung). Weiterhin wurde der den Gln. (2a) u. (2b) zugrundeliegende Beton C30/37 unterstellt.

Es ist zu sehen, dass der Einfluss der Bewehrung im Bereich niedriger Bewehrungsgrade, d. h. geringer Beanspruchung, beträchtlich ist. Weiterhin ist aber auch zu sehen, dass schon bei Bewehrungsgraden ab ca. 0,3 % nach EC 2 kleinere – mit zunehmenden Bewehrungsgraden deutlich kleinere – Biegeschlankheiten und damit dickere Plattenstärken gefordert werden als nach DIN 1045-1. In DIN 1045-1 spielen die Größe der Beanspruchung und weitere Parameter, die nachfolgend noch betrachtet werden, keine Rolle. Es ist lediglich gefordert, dass es sich um Platten des üblichen Hochbaus handeln muss.

Wie zu sehen ist, könnten mit EC 2 teilweise rechnerisch Biegeschlankheiten  $L/d > 35$  (bzw.  $L/d > 150/L$ ) realisiert werden. Damit würde der bisherige Erfahrungsbereich verlassen, die Deckenstärken sind zudem baupraktisch nicht sinnvoll. Im Nationalen Anhang zu EC 2 [5] wird daher gefordert, dass mindestens die bekannten Grenzen nach

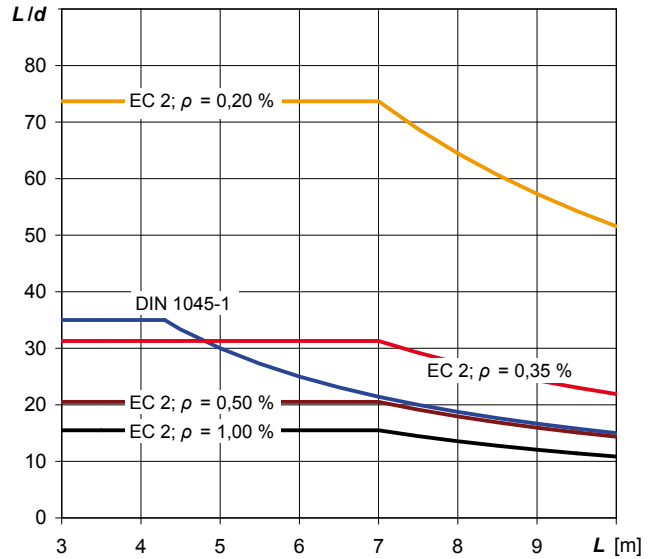


Bild 3. Biegeschlankheit  $L/d$  von frei drehbar gelagerten Einfeldplatten nach DIN 1045-1 und Eurocode 2 bei einer Durchbiegungsbegrenzung auf L/500, Beton C30/37 in Abhängigkeit von der Stützweite L (vgl. [7])

DIN 1045-1 eingehalten werden, so dass zusätzlich zu den Bedingungen nach Gl. (3a) und (3b) die bekannten Bedingungen nach Gl. (2a) und (2b) gelten.

Die Grenze, ab der der Nachweis nach DIN 1045-1 ungünstiger ist, kann Bild 4 und 5 entnommen werden (in der Darstellung ist nur die Durchbiegungsbegrenzung auf L/250 berücksichtigt). Danach ergibt sich für

- Beton C20/25:  $\rho_{lim} = 0,24 \%$
- Beton C30/37:  $\rho_{lim} = 0,32 \%$
- Beton C40/50:  $\rho_{lim} = 0,40 \%$
- Beton C50/60:  $\rho_{lim} = 0,47 \%$ .

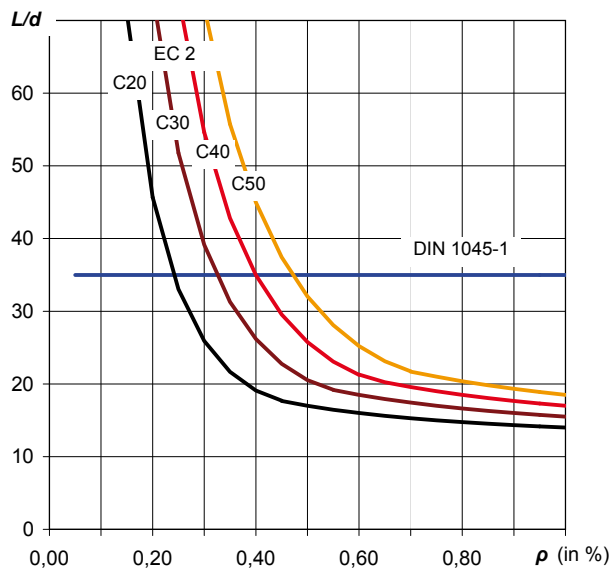


Bild 4. Biegeschlankheit  $L/d$  von frei drehbar gelagerten Einfeldplatten nach DIN 1045-1 und Eurocode 2 bei einer Durchbiegungsbegrenzung auf L/250 in Abhängigkeit von der Längsbewehrung  $\rho$  (vgl. [7])

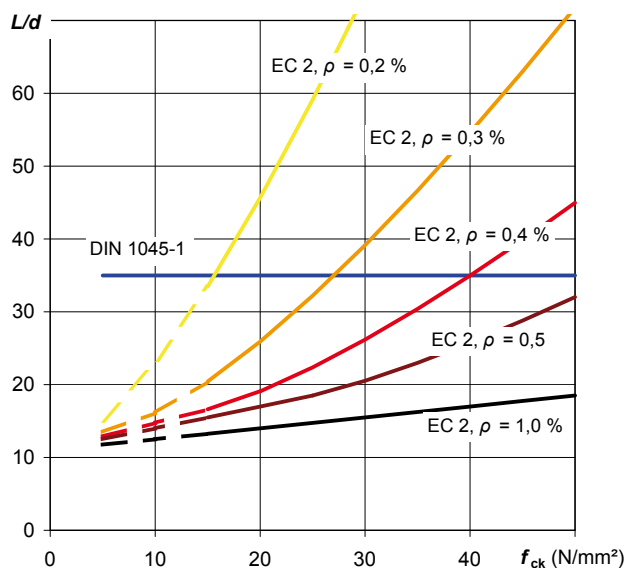


Bild 5. Biegeschlankheit  $L/d$  von frei drehbar gelagerten Einfeldplatten nach DIN 1045-1 und Eurocode 2 bei einer Durchbiegungsbegrenzung auf L/250 in Abhängigkeit von der Betonfestigkeit  $f_{ck}$

2.4 Konstruktionsempfehlungen nach Literaturangaben

Eine Begrenzung der Verformungen ausschließlich auf der Basis der Kontruktionsempfehlungen von DIN 1045-1 erscheint wenig sinnvoll. Mit den Nachweisgleichungen nach EC 2 ist zwar eine genauere Analyse möglich, das Verfahren hat aber den Nachteil, dass die Bewehrung bereits bekannt sein muss.

Auf der Grundlage der Ergebnisse von Vergleichsrechnungen wurden daher in [6] erweiterte Tafeln für den Nachweis der Biegeschlankheit aufgestellt. Sie gelten in erster Linie für Platten (aber auch für Balken und erweitern damit den Anwendungsbereich von DIN 1045-1, 11.3.2; Angaben s. z. B. [15]). Für Platten und Balken wird ein unterschiedlicher Ansatz gewählt, weil plattenartige Bauteile auf Grund ihrer Beanspruchung meist eine deutlich geringere Rissbildung aufweisen als Balken.

Für *Platten* (Ausnahme: Flachdecken!) gelten die nachfolgenden Empfehlungen unter der Voraussetzung, dass eine Verkehrslast von  $q \leq 5,0 \text{ kN/m}^2$  und eine Kriechzahl  $\varphi \leq 2,50$  vorliegt. Der Bewehrungsgrad wird nicht berücksichtigt, es wird von „üblicher“ Plattenbewehrung ausgegangen.

$$L_i/d \leq \lambda_i / k_c \tag{4}$$

mit

$$L_i = \eta_1 \cdot L_{eff}$$

$$\lambda_i = k_2 - 3,65L_i + 0,15 L_i^2$$

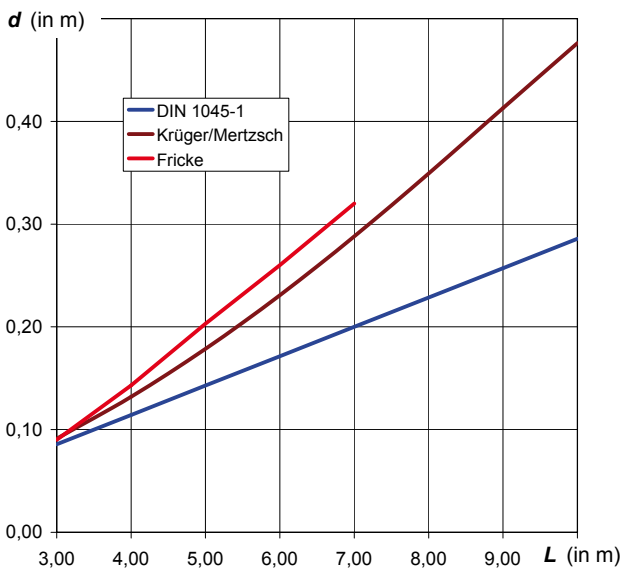
$$k_c = (20 / f_{ck})^{1/6} \text{ mit } f_{ck} \text{ in N/mm}^2$$

$$L_{eff} = L_{min} = L_y$$

$$\eta_1 \approx \alpha \text{ mit } \alpha \text{ nach Tabelle 1 (genauere Werte für } \eta_1 \text{ s. [15])}$$

$$k_2 = \begin{cases} 42,5 & \text{für eine Begrenzung auf L / 250} \\ 35,2 & \text{für eine Begrenzung auf L / 500} \end{cases}$$

Die zulässigen Biegeschlankheiten  $\lambda_i$  sind in Tabelle 2 dargestellt.



a) Anforderungen L/250

zul. Durchbiegung	L / 250				L / 500			
	≤ 4,0	6,0	8,0	10	≤ 4,0	6,0	8,0	10
$L_i$ (in m)								
$\lambda_i$	29	26	23	21	23	19	16	14

Tabelle 2 Grenzschlankheit  $\lambda_i$  bei Platten (Beton C20/25)

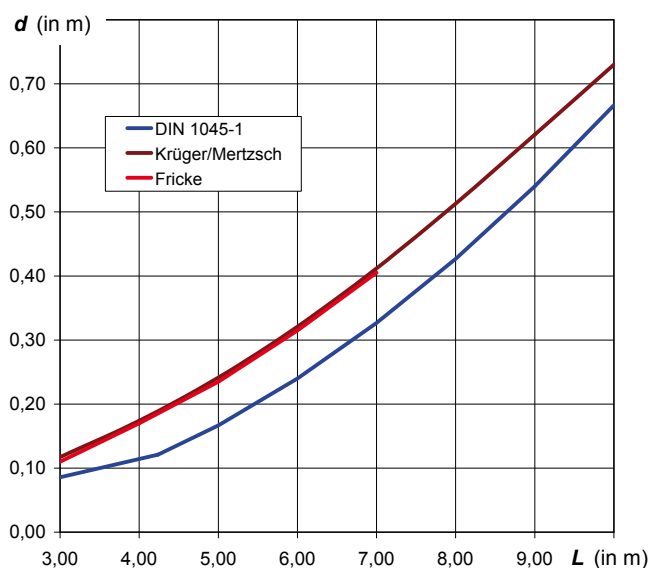
Für *Flachdecken*, d. h. Platten, die ohne Unterzüge direkt auf Stützen gelagert sind, erfolgt der Nachweis prinzipiell wie bei Platten, jedoch mit  $L_i = \alpha_1 \cdot L_{eff}$  mit  $\alpha_1 = 0,85$  und  $L_{eff} = L_{max}$ , d. h., generell auf der Basis der größeren Stützweite und mit einem einheitlichen Beiwert  $\alpha_1$ .

Wie zu sehen, sind nach [6] die zulässigen Biegeschlankheiten teilweise deutlich kleiner und damit die Plattendicken entsprechend größer als in DIN 1045-1 gefordert (vgl. Bild 6). Die Untersuchungen von [8] kommen zu sehr ähnlichen Ergebnissen, in der für eine Verkehrslast von 5,0 kN/m<sup>2</sup> (davon quasi-ständig 40 %) die ebenfalls im Bild 6 dargestellten Plattendicken empfohlen werden. Für eine Begrenzung auf L/250 kommt *Fricke* [8] zu etwas ungünstigeren Ergebnissen.

2.5 Balkenartige Tragwerke

Anders als bei Platten ist bei Balken eine sinnvolle Konstruktionshöhe nicht überwiegend durch die Verformungsbegrenzung bestimmt. Es sind Kriterien der Tragfähigkeit und sinnvollen Bewehrungsführung zusätzlich zu beachten und häufig entscheidend für die Dimensionierung des Tragwerkes. Soweit Verformungskriterien relevant werden, sollte für Balken i. d. R. ein rechnerischer Nachweis der Verformungen geführt werden.

In Veröffentlichungen ist gelegentlich der Hinweis auf die Konstruktionsregeln nach DIN 1045-1 zu finden. Hierzu ist festzuhalten, dass die Anwendung von DIN 1045-1, 11.3.2 (Begrenzung der Biegeschlankheit) für Balken nicht zulässig ist. Sie ist auf Deckenplatten des üblichen Hochbaus beschränkt.



b) Anforderungen L/500

Bild 6. Vergleich der zulässigen Biegeschlankheit von frei drehbar gelagerten Einfeldplatten nach DIN 1045-1, [6] und [8] (Voraussetzungen s. Text)

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Regelungen nach EC 2 auch auf Balken anwendbar sind. Das trifft ebenso für die – hier nicht im Detail wiedergegebene – Konstruktionsempfehlung nach [6] zu. Im Rahmen dieses Beitrages wird hierauf nicht eingegangen.

### 3 Berechnungsbeispiele

Nachfolgend werden beispielhaft die zuvor beschriebenen Verfahren näher erläutert (weitere Beispiele mit ausführlichen Erläuterungen s. a. [10], [11]).

#### 3.1 Beispiel 1

Einfeldplatte mit leichten Trennwänden (erhöhte Anforderungen an die Durchbiegung) bei einer Stützweite  $L = 4,50 \text{ m}$  und einer Nutzhöhe  $d = 18 \text{ cm}$ ; C20/25;  $A_{s,erf} = 5,61 \text{ cm}^2/\text{m}$  (vgl. [15]).

Nachweis:

$$L/d_{vorh} = 4,50 / 0,18 = 25$$

Nach DIN 1045-1:

$$L/d = 150/L = 150 / 4,50 = 33 > 25 \quad (\text{erfüllt})$$

Nach EC 2:

$$\rho = 5,61 / (18 \cdot 100) = 0,0031$$

$$\rho_0 = 20^{0,5} \cdot 10^{-3} = 0,0045 > \rho, \text{ d.h. Gl. (3a) ist maßgebend.}$$

$$\frac{L}{d} = 1,0 \left[ 11 + 1,5 \cdot \sqrt{20} \cdot \frac{0,0045}{0,0031} + 3,2 \cdot \sqrt{20} \cdot \left( \frac{0,0045}{0,0031} - 1 \right)^{3/2} \right] = 25 \geq 25 \quad (\text{erfüllt})$$

(Die Mindestanforderung nach DIN 1045-1 sind nicht maßgebend, s.o.)

#### 3.2 Beispiel 2

Gegeben:

Abmessungen:

Einfeldrige Platte mit  $L = 6,50 \text{ m}$ ;  $h/d = 32,5 / 30,0 \text{ cm}$

Belastung:

$$g_k = 9,13 \text{ kN/m}^2; q_k = 10,0 \text{ kN/m}^2 (\psi_2 = 0,4)$$

Baustoffe:

BSt 500 S; C20/25

Biegezugbewehrung:

$$A_{s,erf} = 12,0 \text{ cm}^2/\text{m}; A_{s,vorh} = 13,5 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (\text{vgl. [8]})$$

Gesucht: Verformungsbegrenzung unter Einhaltung der Grenze  $L/250$

Eine Anwendung von DIN 1045-1 ist hier nicht zulässig, da es sich zwar um ein Plattentragwerk handelt, allerdings bei einer Nutzlast von  $10 \text{ kN/m}^2$  kein üblicher Hochbau vorliegt (es ergäbe sich eine Nutzhöhe von  $d \geq 6,50/35 = 0,19 \text{ m}$ , womit die geforderte Verformungsbegrenzung nicht einzuhalten wäre).

Die Konstruktionsempfehlungen nach [6] sind hier ebenfalls nur bedingt anwendbar, da die hier vorliegende Verkehrslast außerhalb des Anwendungsbereichs liegt (es ergäbe sich etwa  $d \geq 6,50/25 = 0,26 \text{ m}$ ; vgl. Tabelle 2).

Nach Eurocode 2 erhält man bei  $\rho_{erf} = 12,0/30 = 0,40 \%$  etwa  $L/d = 19$ ; dieser Wert darf wegen der zu groß gewählten Bewehrung korrigiert werden, näherungsweise mit  $A_{s,vorh}/A_{s,erf} = 13,5/12,0 = 1,13$ . Man erhält damit  $d_{erf} \geq 650/(19 \cdot 1,13) = 0,30 \text{ m}$ . Eine rechn. Ermittlung mit dieser Nutzhöhe – berücksichtigt wurde Kriechen mit  $\varphi_{\infty} = 2,5$  und Schwinden mit  $\varepsilon_{cs,\infty} = -0,6 \%$  – ergibt eine Durchbiegung von  $2,7 \text{ cm} \approx L/250 = 650/250 = 2,6 \text{ cm}$ .

**Hinweis:** Für eine rechnerische Ermittlung ist ggf. zu beachten, dass zunächst bei der Festlegung der ungerissenen Bereiche die seltene Lastfallkombination zu berücksichtigen ist; unter dieser Lastfallkombination kann es zu Rissen in Bereichen kommen, die unter der quasi-ständigen Last als ungerissen zu betrachten wären. Dieses Vorgehen unterstellt allerdings den ungünstigen Fall, dass schon direkt mit Belastungsbeginn die volle rechnerische Nutzlast auftritt.

#### 3.3 Beispiel 3

Gegeben:

Abmessungen:

Zweifeldrige Platte mit  $L_1 = 5,20 \text{ m}$ ,  $L_2 = 4,80 \text{ m}$ ;

$h/d = 19,0 / 16,5 \text{ cm}$

Belastung:

$$g_k = 6,00 \text{ kN/m}^2; q_k = 5,0 \text{ kN/m}^2 (\psi_2 = 0,4)$$

Baustoffe:

BSt 500 S; C20/25

Biegezugbewehrung:

$$A_s = 5,13 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Kriechen, Schwinden:

$$\varphi_{\infty} = 2,5; \varepsilon_{cs,\infty} = -0,6 \%$$

Gesucht: Verformungsbegrenzung unter Einhaltung der Grenze  $L/250$

Vereinfachend darf für die Ersatzstützweite das Endfeld eines Durchlaufträgers zugrunde gelegt werden:

$$\min L / \max L = 4,8/5,2 = 0,92 > 0,8$$

Nach DIN 1045-1 ergibt sich mit  $L_i/d = 35$

$$d_{erf} \geq (0,8 \cdot 520)/35 \approx 12 \text{ cm}$$

Nach EC 2 [4] erhält man mit

$$\rho = 5,13 / (100 \cdot 16,5) = 0,0031 (> \rho_0)$$

$$L/d = K \cdot 25 = 1,3 \cdot 25 = 32,5$$

$$d_{erf} \geq 520/32,5 \approx 16 \text{ cm} \quad (\text{erfüllt})$$

In [9] wurde in einer Verformungsberechnung nach dem „Affinitätsprinzip“ (d. h. ungerissene Bereiche wurden nicht berücksichtigt) eine Durchbiegung von  $2,6 \text{ cm}$  ermittelt.



## 4 Kritische Bewertung

Wie bereits ausgeführt, hängt die Größe der Durchbiegungen von einer Vielzahl von Einflussgrößen ab, die zudem streuende Größen sind; Durchbiegungen können daher immer nur abgeschätzt werden. Der entwerfende Ingenieur sollte sich jedoch darüber im Klaren sein, welche Nachweisformate besonders unsicher sind und auch, durch welche Faktoren Verformungen günstig oder ungünstig beeinflusst werden.

Der Einfluss der Druck- und Zugfestigkeit, der Umgebungsbedingungen (Kriechen und Schwinden) und des Belastungszeitpunkts auf die Verformungsvorhersage wird in [6] untersucht. Für ein ausgewähltes Beispiel – eine 5,0 m weit gestützte Stahlbetonplatte mit  $h/d = 20\text{ cm} / 17,5\text{ cm}$ , Beton  $\geq C20/25$  und Betonstahl BSt 500 sowie einer Belastung von  $g_k = 6,50\text{ kN/m}^2$  und Verkehrslasten bis  $5,0\text{ kN/m}^2$  – wurde zusammenfassend festgestellt:

- **Zugfestigkeit:**  
Bei geringer Beanspruchung mit nur kleinen gerissenen Bereichen, ist der Einfluss groß. Eine um 20 % geringere Betonzugfestigkeit führt um bis zu 20 % höheren Verformungen. Bei größerer Beanspruchung mit weiten Rissbildungsbereichen ist der Einfluss dagegen gering.
- **Druckfestigkeit:**  
Der Einfluss der Betondruckfestigkeit (Über-, Unterfestigkeit) ist i. Allg. gering; bei einer Betondruckfestigkeit zwischen  $f_{ck} = 20\text{ MN/m}^2$  und  $f_{ck} = 50\text{ MN/m}^2$  liegen die Abweichungen im Bereich  $\leq 25\%$  (Zugfestigkeit unverändert).
- **Umgebung:**  
Die unterschiedlichen Umgebungsbedingungen beeinflussen das zeitabhängige Verhalten, insbesondere das Schwinden. Bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % (Innenbauteil) werden gegenüber  $RH = 80\%$  (Außenbauteil) um bis zu 15 % größere Verformungen ermittelt.
- **Belastungszeitpunkt:**  
Ab  $t_0 = 14\text{ Tage}$  (Ausschalfrist) werden keine nennenswerten Unterschiede mehr festgestellt. Ein früherer Erstbelastungszeitpunkt wirkt sich jedoch ungünstig mit deutlich größeren Verformungen aus.

Die strengere Anforderung einer Begrenzung auf  $L/500$  zur Vermeidung von Schäden an angrenzenden Bauteilen bezieht sich auf die *nach dem Einbau* dieser Bauteile auftretenden Verformungen; d. h., dass ggf. Anfangsdurchbiegungen, die in den ersten Wochen nach dem Ausschalen auftreten, nicht berücksichtigt zu werden brauchen. In [13] werden hierzu am konkreten Zahlenbeispiel für einige unterschiedliche Einbauzeitpunkte erforderliche Deckenstärken genannt, die deutlich günstiger sein können. Anzumerken ist hierbei, dass der Tragwerksplaner den Einbauzeitpunkt der relevanten Bauteile dann natürlich genauer mit den Ausbaugewerken abstimmen muss.

## 5 Zusammenfassung

Wie aus den zuvor dargestellten Vergleichen hervorgeht, ergeben sich teilweise erhebliche Unterschiede in der Wahl einer zweckmäßigen Plattendicke. Die Konstruktionsempfehlungen nach DIN 1045-1 ergeben dabei häufig die geringsten Konstruktionshöhen und damit auch die größten Verformungen. Wie gezeigt, lassen sich mit diesen Konstruktionshöhen häufig nicht die Forderungen einer Begrenzung auf  $L/250$  bzw.  $L/500$  erfüllen.

Die vereinfachenden Konstruktionsregeln nach DIN 1045-1 sollten daher mit Vorsicht verwendet werden und zwar insbesondere dann, wenn entsprechende Erfahrungen fehlen und günstige Wirkungen (ungewollte Einspannungen, Querabtrag von Lasten u.a.m) nicht vorliegen. Im Zweifelsfall, wenn Verformungen kritisch werden können, empfiehlt sich generell ein rechnerischer Nachweis.

## Literatur

- [1] DAfStb-H.525: Erläuterungen zu DIN 1045-1; hier: Zilch/Donaubauer/Schneider: Zur Berechnung und Begrenzung der Verformungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. 2003
- [2] DAfStb-H240: Grasser/Linse: Hilfsmittel zur Ermittlung der Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken nach DIN 1045, Ausg. Juli 1988. 3. Auflage, 1991
- [3] DAfStb-H.193: Mayer/Rüsch: Bauschäden als Folge der Durchbiegung von Stahlbeton-Bauteilen. 1967
- [4] DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2, Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau. Oktober 2005
- [5] DIN EN 1992-1-1/NA: Nationales Anwendungsdokument zu DIN EN 1992-1-1. Fassung März 2010 (abgedruckt in: Fingerloos et al. „Eurocode 2 für Deutschland“; Beuth Verlag, Ernst & Sohn, 2010)
- [6] Krüger/Mertzsch: Verformungsnachweise – Erweiterte Tafeln zur Begrenzung der Biegeschlankheit. In: Avak/Goris: Stahlbetonbau aktuell, Jahrbuch 2003; Bauwerk Verlag, 2003
- [7] Fingerloos, F.: Begrenzung von Spannungen, Rissbreiten und Verformungen. In: Eurocode 2 für Deutschland; Beuth Verlag, Ernst & Sohn, 2010
- [8] Fricke, K.-L.: Berechnungen der Durchbiegungen von Stahlbetonbauteilen; Praktische Anwendung im Ingenieurbüro. In: Avak/Goris: Stahlbetonbau aktuell, Jahrbuch 2001; Werner Verlag, 2001
- [9] Litzner, K.-U.: Grundlagen der Bemessung nach Eurocode 2 – Vergleich mit DIN 1045 und DIN 4227. In: Betonkalender 1996. Ernst und Sohn, 1996
- [10] Goris, A.: Stahlbetonbau-Praxis nach DIN 1045 neu. Band 1: Grundlagen, Bemessung, Beispiele; 3. Auflage 2008, Bauwerk Verlag, Berlin  
Band 2: Bewehrung, Konstruktion, Beispiele; 3. Auflage 2008, Bauwerk Verlag, Berlin
- [11] Goris, A.: Stahlbetonbau-Praxis nach Eurocode 2. Bauwerk Verlag, Berlin, 2010 (in Vorb.)
- [12] Stiglat, K.: Näherungsberechnung der Durchbiegungen von Biegeträgern aus Stahlbeton. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 4, 1995
- [13] Steiner, J.: Durchbiegungsberechnung an Stahlbetonträgern oder Schlankheitsnachweis? Richtigstellung und Ergänzung, Beton- und Stahlbetonbau, Heft 6, 2005
- [14] Strohbush, J.: Beitrag zur Verformungsberechnung im Stahlbetonbau mit kritischer Bewertung bestehender Regelungen; Dissertation Universität Siegen (in Vorb.)
- [15] Goris, A.: Stahlbeton- und Spannbetonbau nach Eurocode 2. In: Schneider Bautabellen für Ingenieure; 19. Auflage, Werner Verlag, 2010